

KFKI-1981-20

DR. PERNECZKI L.
TROSZTEL I.

P E R F - 6
SZÁMITÓGÉPES PROGRAM ATOMREÁKTOROK
HATSZÖGES KAZETTA RÁCSÁNAK
TERMOHIDRAULIKAI ANALIZISÉRE

Hungarian Academy of Sciences

CENTRAL
RESEARCH
INSTITUTE FOR
PHYSICS

BUDAPEST

P E R F - 6

SZÁMITÓGÉPES PROGRAM ATOMREAKTOROK HATSZÖGES
KAZETTA RÁCSÁNAK TERMOHIDRAULIKAI ANALIZISÉRE

Dr. Perneczky L., Trosztel I.
Központi Fizikai Kutató Intézet
1525 Budapest 114, Pf.49

KIVONAT

A PERF-6 számítógépi program a könnyűvíz hűtésű reaktorzóna termohidraulikai jellemzőinek meghatározására szolgál stationer üzemállapotban. A hat-szögletes kazetták fala lehet zárt vagy perforált. A FORTRAN-IV nyelven írt, IBM-360 és ESZ-1040 számítógépen futtatható program a PERF program VVER - típusu reaktorzónák számítására alkalmas továbbfejlesztett, szegmentált és SI egységeket használó inputtal és outputtal rendelkező változata.

АННОТАЦИЯ

Программа PERF-6 предназначена для расчета теплогидравлических характеристик активной зоны водо-водяных реакторов в стационарных условиях. Стенка шестигранных кассет может быть сплошной или перфорированной. Записанная на языке FORTRAN-IV на ЭВМ IBM-360 и ЕС-1040 программа является усовершенствованным, применимым для расчета зоны ВВЭР вариантом программы PERF, имеющим модулярную структуру. Входные и выходные данные задаются в системе SI.

ABSTRACT

The PERF-6 code calculates thermohydraulic parameters in light - water reactor cores at steady - state condition. The shroud may be perforated or closed. The code is written in FORTRAN-IV and can be used on computers of types IBM-360 and ES-1040. This code is an improved and segmented version of the PERF code and enables calculation of the reactor core with a hexagonal lattice. An SI option is available for the input and output.

1. BEVEZETÉS

A PERF-6 számítógépi program könnyűvíz hűtésű reaktorokban lévő hűtőfolyadék termohidraulikai jellemzőinek számítására szolgál stacioner üzemállapot esetén. A kazetták fala lehet zárt vagy perforált.

A program input adatai: a zóna geometriája, a hűtőközeg belépő jellemzői és hőfizikai paraméterei, valamint a hőteljesítmény eloszlása a zónában.

A PERF-6 a Westinghouse THINC-I program [1], [2] lényegesen továbbfejlesztett változata. A fejlesztés során a programot kibővítettük. Ezáltal hatszöges fűtőelemelrendezésű reaktorok hűtőközegének tulajdonságai is vizsgálhatók lettek. Lehetővé vált az input adatok megadása és az eredmények kinyomtatása SI mértékegységekben. A program belső szerkezetét lényegesen megváltoztattuk, hogy távolabbi terveinknek megfelelően más programokhoz közvetlenül kapcsolható legyen és így nagyobb programokba beépíthessük, amikor szubrutinként való hívása bármikor szükséges lehet.

A tanulmány a felhasználók munkáját szeretné megkönnyíteni a program használatához szükséges információk közreadásával.

2. ÚJ LEHETŐSÉGEK A PERF-6 PROGRAMBAN

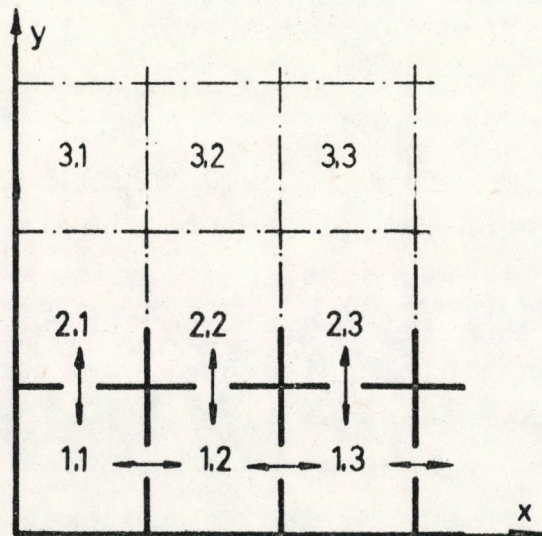
A PERF-6 FORTRAN nyelven írt számítógépi program a hűtőfolyadék sebesség, entalpia és nyomáseloszlását számolja stacioner esetben könnyűvíz hűtésű reaktorok fűtőelemkötegeiben. Segítségével olyan reaktorzónák számíthatóak, melyek azonos geometriájú kazettákból állnak. A kazetták fala lehet zárt vagy perforált. A perforáltfalu kazettáknál feltételezzük, hogy a keresztáramlási ellenállás a kazetták között véges értékű.

A reaktorzónát egyforma hosszúságú axiális szakaszokra osztjuk. Az axiális szakaszok értelemszerűen úgy kapcsolódnak egymáshoz, hogy az egyikből kilépő hűtőközeg-paraméterek és a másikba belépő paraméterek megegyeznek. A zónában az üzemanyagrudak rögzítésére szolgáló távtartók hatását figyelembe tudjuk venni az általuk okozott áramlási ellenállás értékekkel.

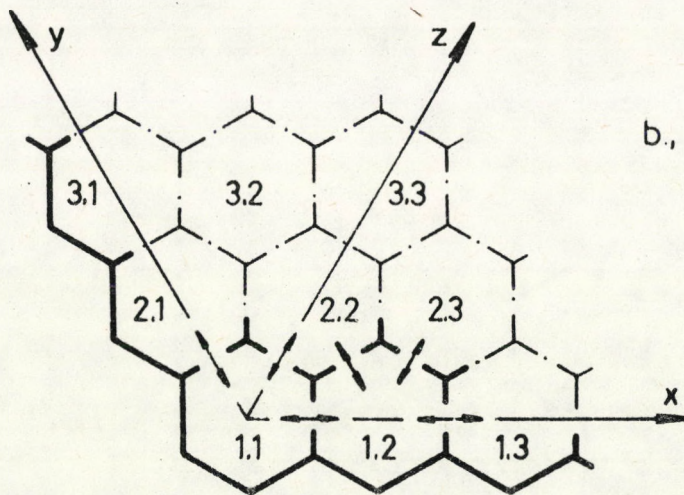
Az axiális osztásokra felírt tömeg-, energia- és momentum-megmaradási egyenleteket azzal a korlátozással oldjuk meg, hogy a hűtőfolyadéknak a zónából való kilépésénél a statikus nyomás minden kazettára azonos. Ha a hűtőközeg kétfázisú, akkor ezt a megmaradási egyenletekben figyelembe vesszük.

A THINC-I programhoz viszonyítva a PERF-6 program a következő három tekintetben jelent előrelépést:

- 1./ A THINC-I kód négyzetes fűtőelemelrendezésű reaktorok hűtőközegének vizsgálatára készült /1a. ábra/. A Szovjetunióban kifejlesztett és többek között hazánkban is épülő VVER - 440, valamint a távlatilag számításba jövő VVER - 1000 típusú reaktorokban a fűtőelemek háromszög-rácsban helyezkednek el, a fűtőelemköteget tartalmazó



a.



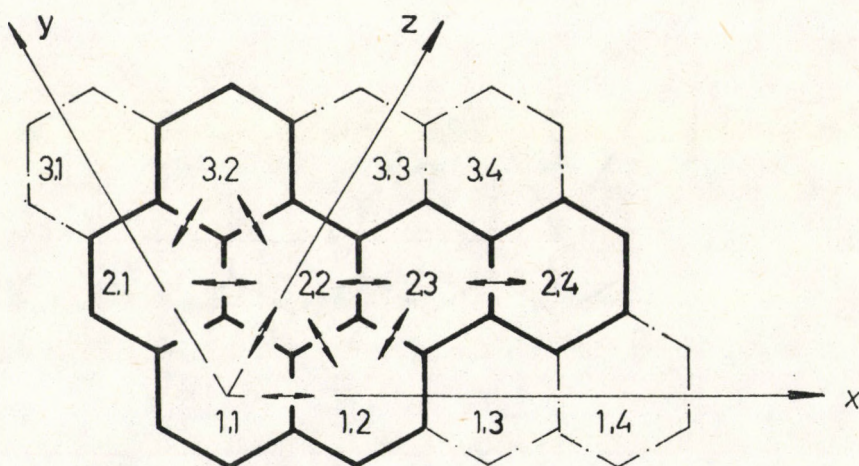
b.

1. ábra

kazetták pedig hatszögletesek. Így szükségessé vált a program ilyen irányú fejlesztése. A számítási séma vonatkozásában ez szükségessé tette, hogy ne csak négy, hanem hat perforált kazettafalon keresztül történő keresztáramlás is kezelhető legyen. Tehát az 1b. ábrán látható módon változott a geometriai model.

A geometriai model nem korlátozza a program alkalmazhatóságát szabályos, rombusz vagy romboidhoz hasonló felépítésű kötegrácsokra; mód van arra is, hogy a reaktorzónák szabálytalan külső felületét figyelembevehessük. Például a 2. ábrán vastag vonallal körülhatárolt kötegcsoport számítása úgy történhet, hogy az /1,3/, /1,4/, /3,1/, /3,3/ és /3,4/ fiktív kötegek hozzáadásával "szabályosra" egészítjük ki a geometriát. A fiktív kötegeket nulla sűrűségű beáramló hűtőközeg megadásával zárhatjuk ki a tényleges számításokból.

Mint a 2. ábrából látható, a kazetták azonosítására egy indexpár alkalmazása szükséges. A különféle hűtőközegjellemzők megadása és felhasználása is az indexpárnak megfelelően történik.



2. ábra

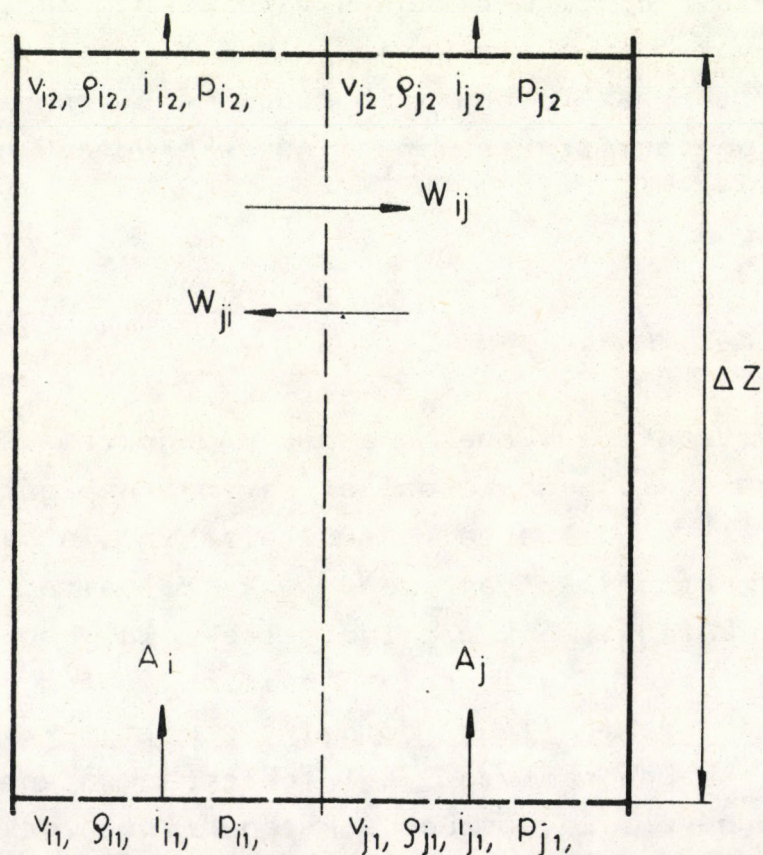
- 2./ A program flexibilis alkalmazása programrendszerek, vagy nagyobb programok keretében rugalmas, logikailag rendezett belső szerkezet kidolgozását tette szükségessé. A THINC-I program kiterjedt főszegmense nem volt megfelelő szerkezetű. Ezért leválasztottuk róla az adatbevitelt és eredménykivitelt, ezeket valamint a megmaradt főprogramszegmenst külön szubrutinokban helyeztük el. A szubrutin futás megszakitása után a numerikus számítás későbbi folytatásához szükséges változók és tömbök, valamint a kimenő és bemenő adatok közös adatmezőbe /COMMON/ kerültek. A szegmentált program önálló programként továbbra is használható, ezt biztosítja egy rövid főprogramszegmens /lásd I. Melléklet/.
- 3./ A program könnyebb felhasználása érdekében lehetővé tettük az SI mértékegységek használatát. Ha a felhasználó az input adatokat SI mértékegységekben adja meg, akkor az eredményeket is abban kapja. Mivel a program magját képező számító rész továbbra is angol mértékrendszerben dolgozik, megtartottuk az angol mértékegységek használatának lehetőségét is.

3. MATEMATIKAI MODEL

A program matematikai modelje a hűtőközegparamétereknek az egész zónában való meghatározását kívánja szolgálni, ezért a kötegen belüli eloszlás leírásától eltekint. A jelenlegi programverzió ezért csak olyan eredmények szolgáltatására képes, melyek mint kötegátlagok értelmezhetők. Így maguk a fűtőelemek nem kerülnek tárgyalásra a számítások során, ahol szerepüket egy térfogati átlagos hőfejlődés váltja ki. Ennek számítását maga a program végzi a fűtőelemrácsra vonatkozó néhány adat segítségével. Egyebekben a köteg belső szerkezete a távtartók hidraulikai ellenállásával van még figyelembevéve.

A programban használt egyenletek a tömeg-, energia- és momentummegmaradáson alapulnak. Kiindulásként tekintsünk két egymással határos, szomszédos kazetta $/i,j/$ Δz hosszúságú axiális osztását /3. ábra/. Közöttük tételezzünk fel egyenletesen perforált falat. Az ábrán v, ρ, i, p a hűtőközeg sebesség, sűrűség, entalpia és nyomásértékei. Az 1 és 2 indexek a Δz axiális osztás belépő és kilépő értékeire vonatkoznak.

W_{ij} az i és j kazetta közötti keresztáramlás értéke. Ha a Δz osztásközben az i kazettában a statikus nyomás értéke nagyobb, mint amilyen j kazetta statikus nyomása, akkor i kazettából j kazettába történik keresztáramlás és W_{ij} pozitív. Viszont fordítva, ha $p_i < p_j$, akkor j kazettából i kazettába történik keresztáramlás és W_{ij} negatív. Természetesen erre a kazettapárra $W_{ij} + W_{ji} \equiv 0$.



3. ábra

A [3] szerint a keresztáramlási folyadék mennyiségét egy empirikus összefüggés segítségével lehet meghatározni és értéke a hűtőközeg paramétereitől és a kazetta geometriájától függ. Az empirikus összefüggés a következő alakban írható:

$$\Delta p_{ij} = K \rho_{il} v_{ij}^2 / 2 g \quad / 1 /$$

$$K / K_{\infty} |_{ijz} = 1 + C \left[\Delta p_{ij} / (\rho_{il} v_{il}^2 / 2 g) \right]^{-1} \quad / 2 /$$

ahol Δp_{ij} - a statikus nyomáskülönbség a két kazetta között,

$$\Delta p_{ij} = p_{il} - p_{jl}$$

K - a kazetták közötti ellenállástényező

ρ_{il} - a folyadék sűrűsége

v_{ij} - a keresztáramlási folyadék sebessége

g - nehézségi gyorsulás

v_{il} - i kazettába belépő folyadék sebessége

K_{∞} - K -nak az a határértéke, amikor v_{il} megközelítően 0

C - korrelációs állandó

A keresztáramlási folyadék sebessége

$$w_{ij} = \rho_{il} v_{ij} a_{ijz} \Delta z \quad / 3 /$$

ahol a_{ijz} - z axiális osztásközben a keresztáramlási felület i és j kazetta között

Δz - osztásköz

Az /1/, /2/, /3/ egyenletek alapján

$$w_{ij} = \frac{2 g a_{ijz} \Delta z \Delta p_{ij}}{\sqrt{K_{\infty ij} (2 g \Delta p_{ij} / \rho_{il} + C v_{il}^2)}} \quad / 4 /$$

$K_{\infty ij}$ értéke az adott feladat geometriájától függ. C korrelációs állandó értéke 3.5 .

3.1. MEGMARADÁSI EGYENLETEK

3.1.1. Egyfázisú áramlás

Tömegmegmaradási egyenlet

$$A_j v_{j1} \rho_{j1} + \sum_{i=1}^6 w_{ij} = A_j v_{j2} \rho_{j2} \quad / 5 /$$

Energiamegmaradási egyenlet

$$A_j v_{j1} \rho_{j1} i_{j1} + Q_{jz} + (TC)_{jz} + \sum_{i=1}^6 (w_{ij} i_{ij}^*) = A_j v_{j2} \rho_{j2} i_{j2} \quad / 6 /$$

ahol Q_{jz} - a j kazettában lévő fűtőelemeknek a Δz osztás-
közben leadott hője

Q_{jz} értékét a következő egyenlettel adjuk meg:

$$Q_{jz} = q_{jz}'' n_j \prod d \Delta z \quad / 7 /$$

ahol q_{jz}'' - az átlagos lokális felületi hőfluxus a j kazettá-
ra Δz intervallumban

n_j - a j kazettában lévő üzemanyagrudak száma

d - az üzemanyagrud átmérője

$(TC)_{jz}$ a termikus diffúziós tag a j kazettára a Δz intervallum-
ban. Értékét a következő egyenlettel határozzuk meg:

$$(TC)_{jz} = \gamma^* \Delta z \sum_{i=1}^6 \left[G_{ij} a_{ijz} (i_{i1} - i_{j1}) \right] \quad / 8 /$$

ahol γ^* - a termikus diffúziós tényező (TDC), korrelációs
konstans

$$G_{ij} = (v_{i1} \rho_{i1} + v_{j1} \rho_{j1}) / 2 \quad / 9 /$$

Momentummegmaradási egyenlet

$$A_j p_{j1} + A_j \rho_{j1} v_{j1}^2 / g + \sum_{i=1}^6 (w_{ij} v_{ij}^* / g) =$$

$$A_j p_{j2} + A_j \rho_{j2} v_{j2}^2 / g + A_j K_{jz} \bar{\rho}_j \bar{v}_j^2 / 2g +$$

$$A_j g \Delta z \bar{\rho}_j / g \quad / 10 /$$

Az i_{ij}^* és v_{ij}^* entalpia és axiális irányú sebesség kapcsolatban van a keresztáramlással:

$$i_{ij}^* = i_{i1} + \delta_{ij} (i_{j1} - i_{i1}) \quad / 11 /$$

$$v_{ij}^* = v_{i1} + \delta_{ij} (v_{j1} - v_{i1}) \quad / 12 /$$

$$\delta_{ij} = 0, \text{ ha } \Delta p_{ij} > 0$$

$$\delta_{ij} = 1, \text{ ha } \Delta p_{ij} < 0$$

Az i_{j2} értéke

$$i_{j2} = i_{j1} + \Delta i_j \quad / 13 /$$

A Δi_j az /5/, /6/, /11/, /13/ egyenletek segítségével:

$$\Delta i_j = Q_{jz} + (TC)_{jz} + \frac{\sum_{i=1}^6 [w_{ij} (1 - \delta_{ij}) (i_{i1} - i_{j1})]}{(A_j v_{j1} \rho_{j1} + \sum_{i=1}^6 w_{ij})} \quad / 14 /$$

Ha a rendszer nyomását állandónak tekintjük, akkor ρ értékét az i értéke egyértelműen meghatározza, tehát

$$\rho_{j2} = \rho(i_{j2}) \quad / 15 /$$

Ezután az /5/ egyenletből v_{j2} értéke meghatározható:

$$v_{j2} = (A_j v_{j1} \rho_{j1} + \sum_{i=1}^6 w_{ij}) / (A_j \rho_{j2}) \quad / 16 /$$

A sűrűség és sebesség átlagértékeit az alábbiak szerint képezzük:

$$\bar{\rho}_j = (\rho_{j1} + \rho_{j2}) / 2 \quad / 17 /$$

$$\bar{v}_j = (v_{j1} + v_{j2}) / 2 \quad / 18 /$$

A momentummegmaradási egyenletből /10/ p_{j2} értékére a következőt kapjuk:

$$p_{j2} = p_{j1} + \left\{ \rho_{j1} v_{j1}^2 + \sum_{i=1}^6 w_{ij} \left[v_{i1} + \delta_{ij} (v_{j1} - v_{i1}) \right] / A_j - \right. \\ \left. \rho_{j2} v_{j2}^2 - K_{jz} \bar{\rho}_j \bar{v}_j^2 / 2 - g \Delta z \bar{\rho}_j \right\} / g \quad / 19 /$$

Igy a Δz axiális osztásból kilépő hűtőközeg paraméterértékeit i_{j2} , ρ_{j2} , v_{j2} , p_{j2} meghatároztuk.

3.1.2. Kétfázisu áramlás

Kétfázisu áramlás esetén a megmaradási egyenletekben nem-homogén szlippes modellt használunk. Az s index utal az állapotváltozóknak kétfázisu áramlásra definiált szlippel súlyozott értékére.

Tömegmegmaradási egyenlet

$$A_j v_{j1} \rho_{sj1} + \sum_{i=1}^6 w_{ij} = A_j v_{j2} \rho_{sj2} \quad / 20 /$$

Energiamegmaradási egyenlet

$$A_j v_{j1} \rho_{sj1} i_{sj1} + Q_{jz} + (TC)_{sjz} + \sum_{i=1}^6 (w_{ij} i_{sij}^*) = \\ A_j v_{j2} \rho_{sj2} i_{sj2} \quad / 21 /$$

Momentummegmaradási egyenlet:

$$A_j p_{j1} + A_j v_{j1} \rho_{sj1} v_{sj1} / g + \sum_{i=1}^6 (w_{ij} v_{sij}^* / g) =$$

$$A_j p_{j2} + A_j v_{j2} \rho_{sj2} v_{sj2} / g +$$

$$A_j K_{sjz} (\overline{\rho_{sj} v_j})^2 / 2 g \rho' + A_j g \Delta z \bar{\rho}_j / g \quad / 22 /$$

3.1.2.1. A hűtőközeg sűrűségének, entalpiájának és sebességének meghatározása kétfázisú áramlásban

Kétfázisú keverék sűrűsége a gőztartalom, a telített víz és telített gőz sűrűségének segítségével a következő:

$$\rho = \alpha \rho'' + (1 - \alpha) \rho' \quad / 23 /$$

Ebből

$$\alpha = (\rho' - \rho) / (\rho' - \rho'') \quad / 24 /$$

A /23/ egyenlet alapján írjuk fel az áramló folyadék tömegét a keverék valóságos sűrűségének segítségével. Vegyük figyelembe, hogy a slip a telített gőz és telített víz sebességének hányadosa:

$$A v \rho_s = \alpha A s v \rho'' + (1 - \alpha) A v \rho' \quad / 25 /$$

ahol A - az átáramlási keresztmetszet
 v - a folyadék sebessége

A kétfázisú elegy valóságos sűrűsége ρ_s a /25/ egyenletből a /24/ egyenlet behelyettesítésével:

$$\rho_s = [(\rho' - \rho'') \rho + (s - 1) \rho' \rho''] / (\rho' - \rho'') \quad / 26 /$$

A /25/ egyenletet írjuk fel a folyadék energiájára:

$$A v \rho_s i_s = \alpha A S v \rho'' i'' + (1 - \alpha) A v \rho' i' \quad / 27 /$$

Ebből

$$i_s = \left[\alpha S \rho'' i'' + (1 - \alpha) \rho' i' \right] / \rho_s \quad / 28 /$$

A /25/ egyenletet írjuk fel a folyadék momentumára:

$$A v \rho_s v_s = \alpha A S v \rho'' S v + (1 - \alpha) A v \rho' v \quad / 29 /$$

A /29/ egyenletből a /24/ behelyettesítésével:

$$v_s = v \left[(\rho' - S^2 \rho'') \rho + (S^2 - 1) \rho' \rho'' \right] / \left[(\rho' - \rho'') \rho_s \right] \quad / 30 /$$

A termikus diffúziós tag kétfázisú áramlás esetén a /8/ egyenlet alapján:

$$(TC)_{sjz} = \gamma \Delta z \sum_{i=1}^6 \left[G_{sij} a_{ijz} (i_{sil} - i_{sjl}) \right] \quad / 31 /$$

ahol

$$G_{sij} = (v_{il} \rho_{sil} + v_{jl} \rho_{sjl}) / 2 \quad / 32 /$$

i_{sij}^* és v_{sij}^* kifejezése a /11/ és /12/ egyenletek alapján:

$$i_{sij}^* = i_{sil} + \delta_{ij} (i_{sjl} - i_{sil}) \quad / 33 /$$

$$v_{sij}^* = v_{sil} + \delta_{ij} (v_{sjl} - v_{sil}) \quad / 34 /$$

K_{sjz} a Δz osztásközön kétfázisú nyomásveszteségi tényező a j kazettára.

$$\rho_{sj2} = \rho_{sj1} + \Delta\rho_{sj} \approx \rho_{sj1} + E_{j1} \Delta\rho_j \quad / 35 /$$

ahol

$$E_{j1} = (d\rho_s/d\rho)_{j1} = \left[\rho'(1 + u_{j1}\rho'') - \rho''(s_{j1} + u_{j1}\rho_{j1}) \right] / (\rho' - \rho'') \quad / 36 /$$

$$u_{j1} = (ds/d\rho)_{j1} \quad / 37 /$$

ahol s slip csak a ρ sűrűség függvénye.

Ehhez hasonlóan

$$\rho_{sj2} i_{sj2} = \rho_{sj1} i_{sj1} + \Delta(\rho_s i_s) \approx \rho_{sj1} i_{sj1} + B_{j1} \Delta\rho_j \quad / 38 /$$

ahol

$$B_{j1} = \left[d(\rho_s i_s) / d\rho \right]_{j1} = \left[\rho'(i' + u_{j1}\rho'' i'') - \rho'' i''(s_{j1} + u_{j1}\rho_{j1}) \right] / (\rho' - \rho'') \quad / 39 /$$

A /35/ és /38/ egyenletekben lévő közelítés okozta hiba nagyon kicsi, ha megfelelően kicsi az osztásköz vagy nincs nagy térfogati göztartalom.

A /20/, /33/, /35/ és /38/ egyenleteket a /21/ egyenletbe behelyettesítve $\Delta\rho_j$ -re kapjuk:

$$\Delta\rho_j = \rho_{sj1} \left\{ Q_{jz} + (TC)_{sjz} + \sum_{i=1}^6 \left[w_{ij} (1 - \sigma_{ij}) (i_{sil} - i_{sj1}) \right] \right\} /$$

$$(A_j v_{j1} \rho_{sj1} + \sum_{i=1}^6 w_{ij}) (B_{j1} - E_{j1} i_{sj1}) -$$

$$E_{j1} \left\{ Q_{jz} + (TC)_{sjz} + \sum_{i=1}^6 \left[w_{ij} (1 - \sigma_{ij}) (i_{sil} - i_{sj1}) \right] \right\} \quad / 40 /$$

ρ_{sj2} értéke a /26/ egyenlet alapján:

$$\rho_{sj2} = \left[(\rho' - s_{j2}\rho'') \rho_{j2} + (s_{j2} - 1) \rho' \rho'' \right] / (\rho' - \rho'') \quad / 41 /$$

ahol

$$\rho_{j2} = \rho_{j1} + \Delta \rho_j \quad / 42 /$$

A /20/ egyenlet v_{j2} -re rendezve:

$$v_{j2} = (A_j v_{j1} \rho_{sj1} + \sum_{i=1}^6 w_{ij}) / (A_j \rho_{sj2}) \quad / 43 /$$

A /30/ egyenlet alapján

$$v_{sj1} = v_{j1} \left[(\rho' - s_{j1}^2 \rho'') \rho_{j1} + (s_{j1}^2 - 1) \rho' \rho'' \right] / \left[(\rho' - \rho'') \rho_{sj1} \right] \quad / 44 /$$

és

$$v_{sj2} = v_{j2} \left[(\rho' - s_{j2}^2 \rho'') \rho_{j2} + (s_{j2}^2 - 1) \rho' \rho'' \right] / \left[(\rho' - \rho'') \rho_{sj2} \right] \quad / 45 /$$

A /22/ egyenletet p_{j2} -re rendezve kapjuk:

$$p_{j2} = p_{j1} + \left\{ \rho_{sj1} v_{j1} v_{sj1} + \sum_{i=1}^6 w_{ij} \left[v_{sij} + \delta_{ij} (v_{sj1} - v_{s11}) \right] / \right. \\ \left. A_j - \rho_{sj2} v_{j2} v_{sj2} - K_{sj2} (\overline{\rho_{sj} v_j})^2 / \right. \\ \left. 2 \rho' - g \Delta z \bar{\rho}_j \right\} / g \quad / 46 /$$

Igy ρ_{j2} , i_{j2} , v_{j2} , p_{j2} a hűtőfolyadéknek a Δz osztásból kilépő paraméterei meghatározhatók.

Az előző egyenletekben szereplő összetartozó állapotjelzőket input kártyákon táblázatosan kell megadni tetszőlegesen választott entalpiaértékeknél. A táblázatban a szlip az aláhűtött részen 1 értékkel, a telített mezőben a gőztartalom alapján valamely szlipmodellből meghatározott értékkel szerepel.

A táblázat sorai közé eső értékeket a program lineáris interpolációval határozza meg.

3.2. NYOMÁSESÉS SZÁMITÁSA

A hűtőközegnek a kazettába belépésénél és kilépésénél nyomásesés keletkezik. A fűtőelemek távtartói és más fémtárgyak korlátozhatják a folyadék áramlását, ezek szintén nyomásesést okoznak, amely minden egyes kazettára meghatározható:

$$\Delta p = K \rho v^2 / 2 g \quad / 47 /$$

A surlódási nyomásesés egyfázisú áramlásban a kazetta Δz hosszán

$$\Delta p_f = K \bar{\rho} \bar{v}^2 / 2 g \quad / 48 /$$

K meghatározásához a következő összefüggést használjuk:

$$K = (FRFM) f \Delta z / D + (FOFR) \quad / 49 /$$

ahol D - a kazetta egyenértékű átmérője

f - surlódási tényező

(FRFM) - a surlódási tényezőnek a kazettára jellemző szorzója

(FOFR) - a kazettában lévő akadály hatása

Kétfázisú áramlás esetén a /48/ egyenlet:

$$\Delta p_f = K (\bar{\rho}_s \bar{v})^2 / 2 g \rho' \quad / 50 /$$

A program különböző surlódási tényező korrelációkkal számol [4] forrásmentes, aláhűtött forrás és térfogati forrás esetén, valamint a rendszer nyomásától függően 800 - 1850 psia /58.6 - 127.6 bar/ és 1850 - 2150 psia /127.6 - 148.2 bar/ intervallumban.

1. 800 - 1850 psia /58.6 - 127.6 bar/ nyomástartományban

a./ Forrásmentes eset

$$f = f_{iso} (1 - (0.001 q'' / h)) \quad / 51 /$$

ahol f_{iso} - izotermikus surlódási tényező Moody szerint

h meghatározásához a Dittus - Boelter korrelációt használjuk:

$$h = (DB) (v_p)^{0.8} D^{-0.2} \quad / 52 /$$

ahol (DB) - a hűtőközeg fizikai jellemzőinek függvénye és kifejezhető a hőmérséklet és nyomás függvényeként

b./ Aláhűtött forrás

Az aláhűtött forrás kezdeténél a hűtőközeg hőmérséklete:

$$T_{LB} = T_{sat} + 14.7 q''^{0.25} e^{-p/900} - 0.766 q'' / h \quad / 53 /$$

ahol T_{sat} - a rendszer nyomásához /p/ tartozó telítési hőmérséklet

A surlódási tényező összefüggése

$$f = f_{iso} \left\{ 1 + \left[(T_b - T_{LB}) / (T_{sat} - T_{LB}) \right] \left[(FS)^{0.042 (CMN)} - 1 \right] \right\} \quad / 54 /$$

Megjegyzés:

A különböző korrelációkban szereplő állandók angol mértékegységekben vannak, mivel a program magját változatlanul hagytuk és a program ezekbe az összefüggésekbe a változókat angol mértékegységekben helyettesíti be akkor is, ha az input - outputnál SI mértékegységeket használunk.

ahol T_b - a térfogati forráskezdet hőmérséklete
 $(FS)_{0.042}$ - Martinelli - Nelson kétfázisú surlódási tényező szorzója $x=0.042$ gőztartalomnál
 (CMN) - Martinelli - Nelson kétfázisú surlódási tényezőnek a tömegfluxustól függő korrekciója

Ha $v \rho_s < 194.4 \text{ lb}_m/\text{sec}/\text{ft}^2 = 949.14 \text{ kg}/\text{sec}/\text{m}^2$, akkor

$$(CMN) = 1.36 + 0.0005 p + (3.6 \cdot 10^{-4} - 2.57 \cdot 10^{-6} p) v \rho_s \quad / 55 /$$

Ha $v \rho_s > 194.4 \text{ lb}_m/\text{sec}/\text{ft}^2 = 949.14 \text{ kg}/\text{sec}/\text{m}^2$, akkor

$$(CMN) = 1.26 - 0.0004 p + (33.06 + 0.07778 p) / (v \rho_s) \quad / 56 /$$

c./ Térfogati forrás

Ha $x < 4.2 \%$ akkor az aláhűtött forráskor érvényes összefüggéseket használjuk. Ha $x \geq 4.2 \%$ akkor

$$f = f_{iso} (FS)_x (CMN) \quad / 57 /$$

ahol $(FS)_x$ értékére egy jó közelítést ad a következő x -től és α -tól függő összefüggés

$$(FS)_x = \left[(1 - x) / (1 - \alpha) \right]^2 \quad / 58 /$$

2. 1850 - 2150 psia / 127.6 - 148.2 bar / nyomástartományban

a./ Forrásmentes eset

$$f = f_{iso} \left[1 - (0.001915 q'' / h) \right] \quad / 59 /$$

ahol f megengedett legkisebb értéke $0.85 \cdot f_{iso}$.

b./ Aláhűtött forrás

$$f = f_{iso} (1 - 0.0025 \Delta T^*) \left(1 + 32.36 (v \rho_s)^{-2/3} \cdot \left[1 - \Delta T^* / (0.766 q'' / h) \right] \right) \quad / 60 /$$

ahol $\Delta T^* = T_{LB} + 0.766 q'' / h - T_b$
és $1 - 0.0025 \Delta T^*$ minimális értéke 0.85 lehet.

c./ Térfogati forrás

A 800 - 1850 psia /58.6 - 127.6 bar/ nyomástartományra érvényes egyenleteket használjuk.

3.3. HŐFLUXUSELOSZLÁS

A hőfluxuselozslás megadására több lehetőség közül lehet választani. Megadható radiálisan és axiálisan minden kazettára és axiális osztásra külön - külön. De lehetőség van arra, hogy csak radiális hőfluxuselozslást adunk meg kazettánként és az axiális hőfluxuselozslást a kazetta radiális helyzetétől függetlenül adjuk meg. A hőfluxus axiális irányu változása megadható axiális osztásonként, de sok esetben leírható az axiális távolság trigonometrikus függvénye alapján.

3.3.1. Cosinus függvény szerinti axiális hőfluxuselozslás

$$\varnothing(l) = \varnothing_{max} \cos(\alpha_0 l) \quad / 61 /$$

ahol $\varnothing(l)$ - lokális hőfluxus az l helyen

\varnothing_{max} - $\varnothing(l)$ maximális értéke

α_0 - állandó és nagyobb mint 0

l - dimenziótlán axiális koordináta -1 -től +1 -ig változik a helytől függően

A /61/ egyenletből következik, hogy a maximális hőfluxus az $l=0$ helyen van. Az axiális forró csatorna faktor F_Z^N a \varnothing_{\max} és $\varnothing_{\text{átl}}$ hányadosa /lásd 4a ábra/:

$$F_Z^N = \frac{\alpha_0}{\sin \alpha_0} \quad / 62 /$$

Ha $F_Z^N > \frac{\pi}{2}$, akkor $\alpha_0 > \frac{\pi}{2}$ és \varnothing hőfluxus negatív lesz. Tehát a /61/ egyenlet az axiális hőfluxus leírására csak akkor használható, ha $F_Z^N < \frac{\pi}{2}$.

3.3.2. Módosított cosinus függvény szerinti axiális eloszlás

Ha $F_Z^N > \frac{\pi}{2}$, akkor a hőfluxuseloszlás megadására a következő módosított cosinus függvényt használjuk /lásd 4b ábra/:

$$\varnothing(l) = A_1 \cos(\alpha_0 l) + B_1 \quad / 63 /$$

A_1 és B_1 értékét $l=0$ és $l=\pm 1$ határfeltételekkel lehet meghatározni. Így a /63/ egyenlet:

$$\varnothing(l) = \varnothing_{\max} \left[\cos(\alpha_0 l) - \cos \alpha_0 \right] / (1 - \cos \alpha_0) \quad / 64 /$$

Az axiális forró csatorna faktor:

$$F_Z^N = (1 - \cos \alpha_0) / \left[(\sin \alpha_0 / \alpha_0) - \cos \alpha_0 \right] \quad / 65 /$$

A /65/ egyenletből F_Z^N ismeretében α_0 meghatározható és így a /63/ egyenlettel tetszőleges helyen illetve tetszőleges $[l_1, l_2]$ intervallumban $\varnothing(l)$ értéke kiszámítható.

3.3.3. Asszimmetrikus cosinus függvény szerinti axiális eloszlás

$$\varnothing(l) = (A_2 + B_2 l) \cos(\alpha_0 l) \quad / 66 /$$

A_2 és B_2 határfeltételek segítségével meghatározhatók.
Igy a /66/ egyenlet:

$$\vartheta(l) = 0.54954 \vartheta_{\max} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 l \right) \cos(\alpha_0 l) \quad / 67 /$$

és az axiális forró csatorna faktor:

$$F_Z^N = 1.1585 \alpha_0 / \sin \alpha_0 \quad / 68 /$$

Ha $F_Z^N > 1.1585 \frac{\pi}{2} = 1.8197$, akkor $\alpha_0 > \frac{\pi}{2}$ és a /67/ egyenletben $l=-1$ esetén $\cos(-\alpha_0) < 0$ így az axiális hőfluxus értéke negatív lesz. Tehát a /67/ egyenlet csak $F_Z^N < 1.8197$ esetben alkalmazható /lásd 4c ábra/.

3.3.4. Módosított asszimmetrikus cosinus függvény szerinti axiális hőfluxuseloszlás

Ha $F_Z^N > 1.8197$ a hőfluxuseloszlást megadhatjuk:

$$\vartheta(l) = (A_3 + B_3 \cdot l) \cdot (\cos(\alpha_0 l) + C_3) \quad / 69 /$$

Határfeltételek segítségével A_3 , B_3 , C_3 meghatározható.

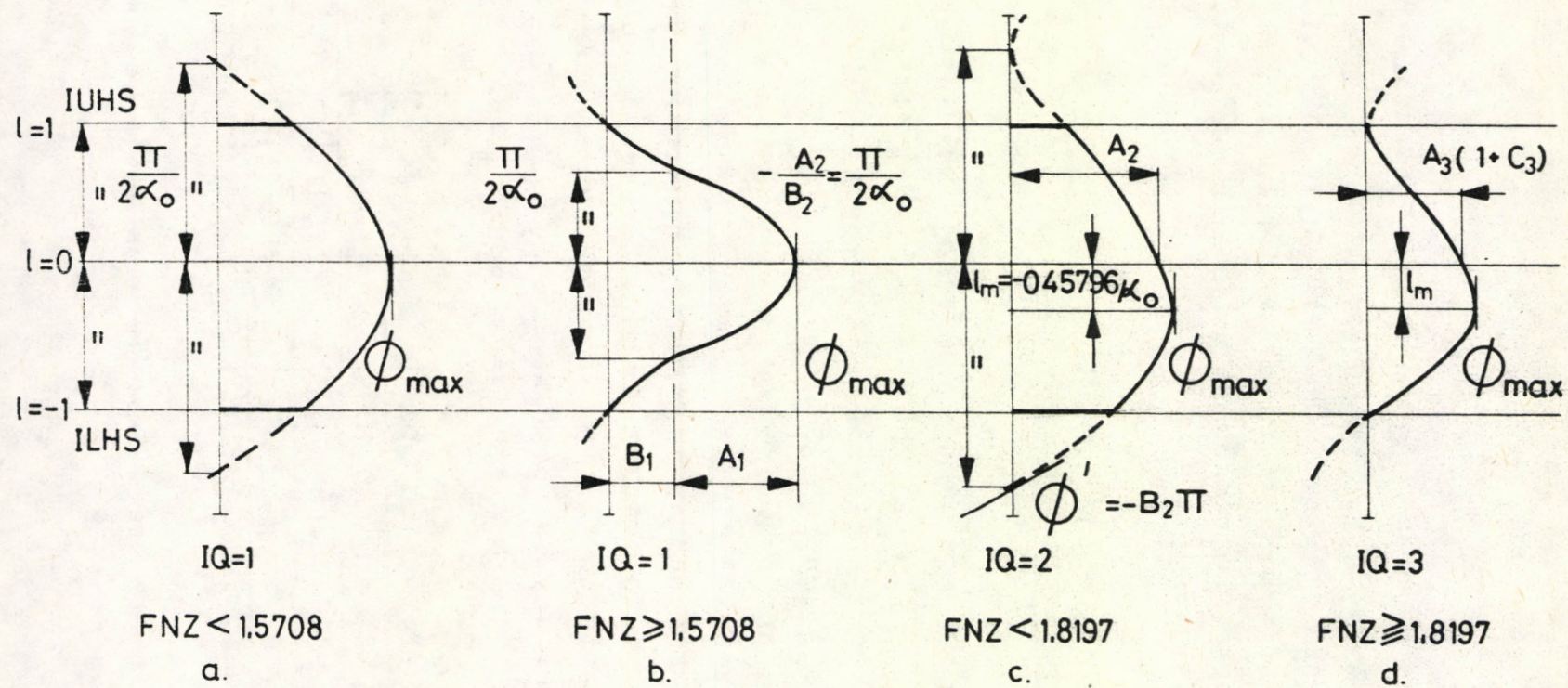
$$\vartheta(l) = \vartheta_{\max} (1 - l) (\cos(\alpha_0 l) - \cos \alpha_0) /$$

$$\left[(1 - l_m) (\cos(\alpha_0 l_m) - \cos \alpha_0) \right] \quad / 70 /$$

ahol l_m - a fluxusgörbe azon helyének koordinátája, ahol a fluxusgörbe érintője 0 /lásd 4d ábra/.

Az axiális forró csatorna faktor:

$$F_Z^N = (\alpha_0 - \alpha_0 l_m) (\cos(\alpha_0 l_m) - \cos \alpha_0) / (\sin \alpha_0 - \alpha_0 \cos \alpha_0) \quad / 71 /$$



4. ábra

4. INPUT ADATOK

A PERF-6 program részére az input adatokat kártyákon lehet megadni. Ha a program magját képező PERF-6 szubrutint más programhoz kapcsoljuk, akkor lehetőség van arra, hogy az adatok beolvasását végző INPUT szubrutin kiiktatásával, a PERF-6 szubrutin más programtól közös adatmezőkön /COMMON/ keresztül kapja meg a számára szükséges adatokat.

1. kártya: formája: 2I5

IU = sorok száma /≤11/

IV = oszlopok száma /≤11/

2. kártya: formája: 8A8, A7, I1

Lehetőség van arra, hogy címet adjunk a futtatni kívánt adatoknak. A cím betűkből és számokból állhat tetszőleges sorrendben a 2-től a 71-ik karakterig. A 72. karakternek "1"-nek kell lenni.

3. kártya: formája: 6I5

ISTEPS = az axiális osztások száma /≤50/

INL = a különböző típusu axiális osztások száma /≤8/

Ha a kazettában nincs az üzemanyagrudak rögzítésére szolgáló távtartó vagy más az áramlást befolyásoló akadály, akkor INL=1.

IQ = a hőfluxus megadásának módja /≤5/

IQ=1	FNZ,ILHS,IUHS		FQR[i,j]
IQ=2	FNZ,ILHS,IUHS		FQR[i,j]
IQ=3	FNZ,ILHS,IUHS		FQR[i,j]
IQ=4		HA[k]	FQR[i,j]
IQ=5			H[i,j,K]

A táblázatban lévő jelöléseket a későbbiekben ismertetjük.

ITER = iterációk számának maximuma

IDPS = a fizikai jellemzők táblázatában a tételek száma / ≤ 40 /

ISI = ha ISI=1, akkor az input - output SI mértékegységekben van

ha ISI=2, akkor az input - output angol mértékegységekben van

4. kártya: formája: 7E10.6

SRIC[i,j] = az i,j kazettában lévő üzemanyagrudak száma
A szögletes zárójelben lévő i,j indexek a kazetta helyét határozzák meg.

i=1...IU

j=1...IV

5. kártya: formája: 7E10.6

AR[i,j] = az i,j kazetta átömlési keresztmetszete,
/m²; ft²/

6. kártya: formája: 7E10.6

DH[i,j] = az i,j kazetta egyenértékű hidraulikus átmérője,
/m; ft/

$$DH[i,j] = \frac{4 \times \text{átömlési keresztmetszet } i,j}{\text{nedvesített kerület } i,j}$$

7. kártya: formája: 7E10.6

PREIN[i,j] = az i,j kazettában a nyomás a belépésnél,
[bar; lb_f/ft²]

8. kártya: formája: 7E10.6

VE[i,j,1] = az i,j kazettában a sebesség a belépésnél,
[m/sec; ft/sec]

Az "1" index jelzi a belépésnél lévő értéket.

9. kártya: formája: 7E10.6

RH[i,j] = az i,j kazettában sűrűség a belépésnél,
[kg/m³; lb_m/ft³]
fiktív kazettára 0.

10. kártya: formája: 7E10.6

PFI[i,j] = az i,j kazettában az átömlési ellenállástényező értéke a belépésnél

11. kártya: formája: 7E10.6

PFO[i,j]= az i,j kazettában az átömlési ellenállástényező értéke a kilépésnél

12. kártya: formája: E10.6, 2I5

Ha $IQ \geq 4$, akkor ez a kártya nem kell.

FNZ = az axiális forró csatorna faktor

ILHS = az első fűtött axiális osztás sorszáma

IUHS = az utolsó fűtött axiális osztás sorszáma

13. kártya: formája: 7E10.6

Ha $IQ \neq 4$, akkor ez a kártya nem kell.

HA[k]= a relativ axiális hőfluxus a k-ik axiális osztásra. Ezek az értékek normalizálhatók, $k=1...ISTEPS$

14. kártya: formája: 7E10.6

Ha $IQ = 5$, akkor ez a kártya nem kell.

FQR[i,j]= az i,j kazettában a relativ radiális hőfluxus egy üzemanyagrudra. Ezek az értékek normalizálhatók.

15. kártya: formája: 7E10.6

Ha $IQ \neq 5$, akkor ez a kártya nem kell.

H[i,j,k]= az i,j kazettában k-ik axiális osztásnál a relativ hőfluxus értéke egy üzemanyagrud-szelvényre. Ezek az értékek normalizálhatók.

16. kártya: formája: 4E10.6

PS = a rendszer nyomása, /bar; psia/

TSAT = a hűtőközeg telítési hőmérséklete, /°C; °F/

FS = Martinelli - Nelson kétfázisú surlódási tényező $x=4.2\%$ gőztartalomnál

RFNS = felületi érdesség, /m; ft/

17. kártya: formája: 4E10.6

HSAT = a telített víz entalpiája, [kJ/kg; Btu/lb_m]

ENTG = a telített gőz entalpiája, [kJ/kg; Btu/lb_m]

RHW = a telített víz sűrűsége, [kg/m³; lb_m/ft³]

RHG = a telített gőz sűrűsége, [kg/m³; lb_m/ft³]

A hűtőközeg fizikai jellemzőinek táblázata, m jelenti a fizikai jellemzőnek a táblázatban elfoglalt helyét.

18. kártya: formája: 7E10.6

$TRO[m]$ = a hűtőközeg sűrűségének m -ik értéke a táblázatban, $[kg/m^3; lb_m/ft^3]$ $m=1...IDPS$

19. kártya: formája: 7E10.6

$TENT[m]$ = a hűtőközeg entalpiájának m -ik értéke a táblázatban, $[kJ/kg; Btu/lb_m]$

20. kártya: formája: 7E10.6

$TESS[m]$ = a hűtőközeg slipértékeinek m -ik értéke a táblázatban

21. kártya: formája: 7E10.6

$TTEM[m]$ = a hűtőközeg hőmérsékletének m -ik értéke a táblázatban, $/^{\circ}C; ^{\circ}F/$

22. kártya: formája: 7E10.6

$TMU[m]$ = a hűtőközeg dinamikus viszkozitásának m -ik értéke a táblázatban, $[kg/sec/m; lb_m/sec/ft]$

Ha a rendszer nyomása ≤ 1850 psia /127.6 bar/, akkor a 23. és 24. kártya nem kell.

23. kártya: formája: 7E10.6

$TGNS[r]$ = a hűtőközeg tömegáramainak értéke, $[kg/m^2/sec 10^{-6}; lb_m/ft^2/hr 10^{-6}]$
 $r=1...6$

24. kártya: formája: 7E10.6

$TCMN[r,m]$ = a Martinelli - Nelson kétfázisú surlódási tényezőnek a tömegáramtól függő korrekciója az r -ik helyen lévő tömegáramnak és az m -ik helyen lévő fizikai jellemzőnek megfelelően.

25. kártya: formája: 14I5

Ha $INL=1$, akkor ez a kártya nem kell.

$LIX[k]$ = axiális osztásonként meg kell adni, hogy milyen típusú az axiális osztás, $1 \leq LIX[k] \leq INL$

26. kártya: formája: 7E10.6

Ha $INL=1$, akkor ez a kártya nem kell.

FRFM[i,j,n] = a nyomásesés egyenletben szereplő surlódási tényező szorzója az i,j kazettára n típusu axiális osztásnál, $n=1...INL$

27. kártya: formája: 7E10.6

Ha $INL=1$, akkor ez a kártya nem kell.

FOFR[i,j,n] = a nyomásesés egyenletben a formatényező veszteség összetevője az i,j kazettára n típusu axiális osztásnál

28. kártya: formája: 7E10.6

Ha $IV=1$, akkor ez a kártya nem kell.

ROLA[i,j,n] = az i,j-1 és az i,j kazetták közötti vízszintes keresztáramlási felület / az axiális osztásköz az n típusu axiális osztásra,
[m^2/m ; ft^2/ft]
 $i=1...IU$; $j=2...IV$

29. kártya: formája: 7E10.6

Ha $IV=1$, akkor ez a kártya nem kell.

ROWK[i,j,n] = az i,j-1 és i,j kazetták közötti keresztáramlási ellenállástényező az n típusu axiális osztásra
 $i=1...IU$; $j=2...IV$

30. kártya: formája: 7E10.6

Ha $IU=1$, akkor ez a kártya nem kell.

COLA[i,j,n] = az i-1,j és az i,j kazetták közötti vízszintes keresztáramlási felület / az axiális osztásköz az n típusu axiális osztásra,
[m^2/m ; ft^2/ft]
 $i=2...IU$; $j=1...IV$

31. kártya: formája: 7E10.6

Ha $IU=1$, akkor ez a kártya nem kell.

COLK[i,j,n] = az i-1,j és az i,j kazetták közötti keresztáramlási ellenállástényező az n típusu axiális osztásra
 $i=2...IU$; $j=1...IV$

32. kártya: formája: 7E10.6

Ha $IU=1$ vagy $IV=1$, akkor ez a kártya nem kell.

$TOLA[i,j,n]$ = az $i-1, j-1$ és az i, j kazetták közötti vízszintes keresztáramlási felület / az axiális osztásköz az n típusu axiális osztásra,
 $[m^2/m; ft^2/ft]$
 $i=2...IU; j=2...IV$

33. kártya: formája: 7E10.6

Ha $IU=1$ vagy $IV=1$, akkor ez a kártya nem kell.

$TOLK[i,j,n]$ = az $i-1, j-1$ és az i, j kazetták közötti keresztáramlási ellenállástényező az n típusu axiális osztásra
 $i=2...IU; j=2...IV$

34. kártya: formája: 4E10.6

FRD = üzemanyagrud átmérője, /m; ft/

Z = az axiális osztásköz, /m; ft/

QN = tényező, amit megszorozva $HA[k] \times FOR[i,j]$ vagy $H[i,j,k]$ értékével a lokális hőfluxust adja, $[kJ/m^2/sec; Btu/ft^2/sec]$

TDC = a termikus diffúzió összefüggésben használt termikus diffúziós tényező

35. kártya: formája: 4E10.6, I32

SC = a keresztáramlási egyenletben szereplő állandó

ENU = kilépésnél a nyomáskonvergencia kritériuma

ENUR = a zónában a nyomáskonvergencia kritériuma

DVFK = a belépő sebesség változásának hányadosa, amelyet a konvergencia mátrix használ

A 35. kártya 72. karakterén "2" kell állni. Ez az adatkártya halmaz ellenőrzésére szolgál.

5. OUTPUT LEHETŐSÉGEK

1. Input adatok

A programba beépítettünk egy olyan szubrutint, amely kinyomtatja az input adatokat. Így lehetőség van az adatok helyességének ellenőrzésére.

2. Információ az iterációkról

Minden iteráció után a következő információk kerülnek kinyomtatásra:

- iteráció száma
- axiális osztás száma
- iterációs kritérium
- X mátrix elemei
- CORV mátrix elemei

3. Output

Az output eredmények sornyomtatón jelennek meg. Ezek a következők:

- az iterációk száma

A következő információk minden kazettára kinyomtatásra kerülnek:

- a kazetta koordinátája i, j
- ezután egy táblázat következik. A táblázat fejléce minden kazettára ugyanaz: axiális osztás száma, hűtőközeg sűrűsége, sebessége, entalpiája, nyomáscsökkenés és tömegfluxus. Az egyes mennyiségek dimenziói és értékei olyan mértékrendszerben kerülnek kinyomtatásra, amelyben az ISI paraméterrel kértük /SI vagy angol mértékrendszer/. Ha aláhűtött forrás, térfogati forrás $/x \leq 4.2 \%$ vagy térfogati forrás $/x > 4.2 \%$ van a zóna valamelyik axiális osztásában, akkor a táblázatban a hűtőközeg entalpiája után kinyomtatásra kerül egy úgynevezett forrási index 1, 2 vagy 3, a forrás típusától függően.

- a statikus nyomáskeresés a belépésnél, a zónán és a kilépésnél
- a statikus nyomáskeresés a kilépésnél
- a hűtőközeg tömegárama a belépésnél és kilépésnél, valamint ezen értékek hányadosa
- a hűtőközeg entalpiája a belépésnél és kilépésnél, valamint ezen értékek különbsége
- a hűtőközeg gőztartalma a kilépésnél
- a hűtőközeg entalpiaértékeiből és tömegáramaiból számolt a hűtőközeg által felvett hőmennyiség, az üzemanyagrud hőfluxusa alapján számolt hőmennyiség, valamint ezen értékek hányadosa.

A következő információk az egész zónára vonatkoznak, az egyes kazettákra vonatkozó értékek összege ill. átlaga:

- a zónába belépő hűtőközeg tömegfluxusának átlagértéke
- a hűtőközeg entalpiakülönbségének átlagértéke
- a teljes belépő tömegáram, a teljes kilépő tömegáram, valamint ezen értékek hányadosa
- a hűtőközeg által a zónában felvett teljes hőmennyiség az entalpiakülönbségből számolva, a hőfluxusból számolva, valamint ezen értékek hányadosa.

6. JELÖLÉSEK

- a - keresztáramlási felület
- d - fűtőelem átmérő
- f - surlódási tényező
- g - nehézségi gyorsulás
- i - entalpia
- n_j - a j kazettában lévő fűtőelemek száma
- p - nyomás
- q'' - átlagos lokális felületi hőfluxus
- v - sebesség
- x - gőztartalom
- Δz - axiális osztásköz

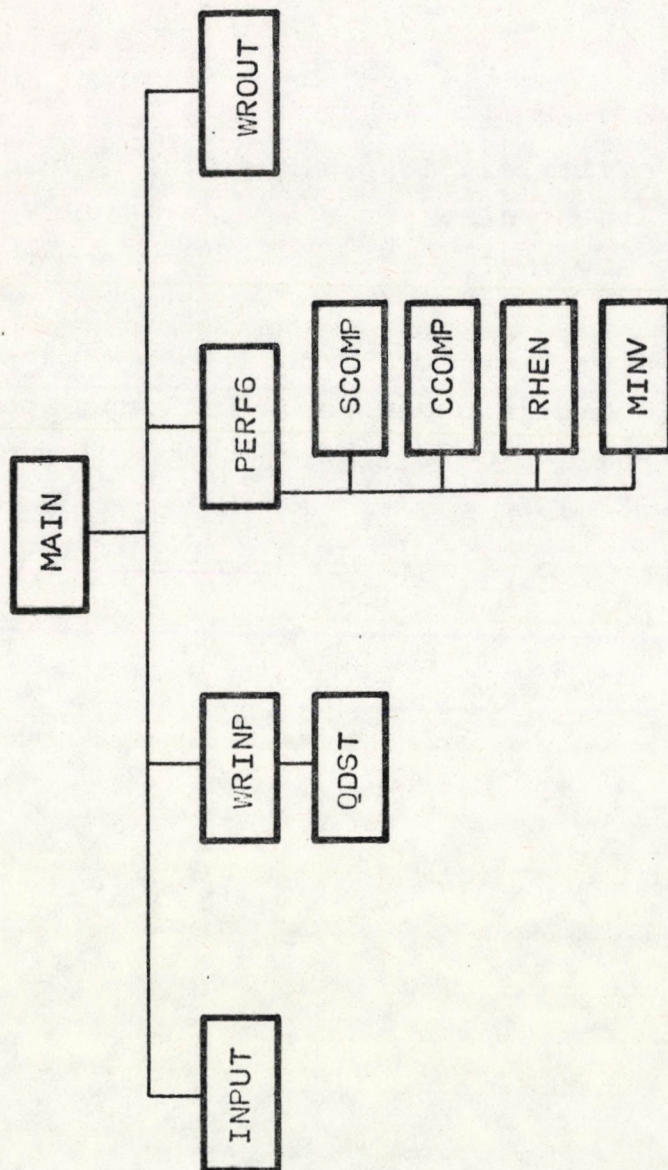
- A - áramlási keresztmetszet
- D - kazetta egyenértékű átmérője
- K - keresztáramlási ellenállástényező
- S - slip
- T - hőmérséklet
- T_{sat} - telítési hőmérséklet
- W - keresztáram

- α - térfogati gőztartalom
- ρ - sűrűség
- γ - termikus diffúziós tényező
- \varnothing - lokális hőfluxus

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Chelemer, H., "THINC-I, A Steady - State Thermal - Hydraulic Interaction Code for Digital Computer", WCAP-2581, February 1964.
- [2] Szabados, L., Tóth, I., "PERF - A Digital Computer Program for Thermohydraulic Investigation of Closed or Semi - Open Reactor Cores", CRIP, 1971.
- [3] Berringer, R.T., Previti, G., Tong, L.S., "The Hydraulic Design of a Model to Simulate an Open Lattice PWR Core", WCAP-1783, May 1961.
- [4] Mendler, O.J., et al., "Natural Circulation Tests with Water at 800 to 2000 psia under Non - Boiling, Local Boiling and Bulk Boiling Conditions", ASME Paper 60-HT-36, 1960.

I. Melléklet



63.133



Kiadja a Központi Fizikai Kutató Intézet
Felelős kiadó: Gyimesi Zoltán
Szakmai lektor: Vigassy József
Példányszám: 200 Törzsszám: 81-194
Készült a KFKI sokszorosító üzemében
Felelős vezető: Nagy Károly
Budapest, 1981. március hó